DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-56
CC BY 4.0

МРНТИ 29.19.16

А. Касымбаев[1*], К. Смирнова[2], А. Погребняк[2]
[1]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова 69
[2]Сумской государственный университет,
40007, Украина, г. Сумы ул. Римского-Корсакова 2
*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ WN/ZrN КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Аннотация: *Из-за возросших требований к инструментам, используемым в экстремальных условиях эксплуатации продления срока службы инструментов широко используются защитные покрытия. В данной работе исследуются физические закономерности получения покрытий MeN (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) многослойных нанокомпозитов на основе WN, а также влияние на микроструктуру, фазовый состав, а также механические и трибологические свойства. Многослойные покрытия WN/MoN являются новой сферой применения, и для производства этих покрытий впервые используется катодно-дуговое физическое осаждение из паровой фазы (CA-PVD). Кроме того, проводятся расчеты из первых принципов для лучшего понимания свойств осажденных мультислоев. Наблюдаются две микроструктуры покрытия с различными типами решетки: (i) гранецентрированная кубическая и (ii) комбинация гексагональной и ГЦК. Среди исследованных систем WN/NbN демонстрирует превосходные свойства, включая самую низкую удельную скорость изнашивания (1,7 × 10^{-6} $мм^3$/Нм), высокую твердость и заметный индекс пластичности. Отличные трибологические характеристики можно объяснить такими факторами, как низкая шероховатость поверхности, высокая упругая деформация до разрушения, образование трибопленок Nb_2O_5 и WO_3 во время скольжения, пластичное поведение NbN и структура нанокомпозита.*

Ключевые слова: *покрытие; микроструктура; механические свойства; износостойкость; CA-PVD.*

1. Введение

В последние десятилетия бурное развитие современных технологий вызвало повышенную потребность в повышении защитных свойств материалов, используемых при производстве различных изделий, таких как режущие инструменты, лопатки турбин, стенки реакторов, биомедицинские имплантаты. Ключевые свойства, которые востребованы в этих материалах, включают повышенную твердость, увеличенный срок службы и повышенную стойкость к износу и окислению, особенно при воздействии высоких температур. Для эффективного удовлетворения этих требований широко распространен подход, заключающийся в нанесении тонкого покрытия с определенными характеристиками на поверхность основного материала. Этот защитный слой служит для защиты материала от разрушения во время эксплуатации в экстремальных условиях. В частности, для этой цели приобрели популярность многослойные конструкции [1,2].

Со второй половины 20-го века многослойные нитридные покрытия стали предметом интенсивных исследований, которые привели к разработке возможных применений в промышленности, аэрокосмической и медицинской областях. С момента первоначального упоминания об этих структурах и до настоящего времени исследователи собрали значительное количество данных о методах осаждения, достижениях, характеристиках и текущем использовании [1-4]. Интересно, что бинарные нитриды продемонстрировали лучшие характеристики металлов, чем последовательности металлов [2,5-8]. Многослойные нитридные покрытия также обеспечивают выдающиеся механические, оптические, электрические и магнитные свойства, а также исключительную устойчивость к износу и коррозии [9-11].

Структура нитридных материалов и виды связей, возникающих между составляющими их элементами, неразрывно связаны с их особыми свойствами. Нитриды, расположенные в междоузлиях (октаэдрических отверстиях) плотноупакованной решетки, по существу представляют собой простые металлические структуры, состоящие из крошечных атомов азота. Для нитридов металлов характерна ГЦК [12,13] или ГПУ кристаллическая решетка с атомами неметаллов, рассредоточенными в межузельном пространстве несколько беспорядочно. Вид переходного металла, который реагирует с азотом, можно определить по одной из трех возможных связей между атомами, и эта концепция допускает некоторые практические модификации [14-16]. К ним относятся ковалентные связи, возникающие между атомом металла в d-состоянии и азотом в p-состоянии, металлические связи с конечной плотностью состояний на уровне Ферми (EF), а также ионные связи, возникающие в результате переноса электронов от атомов металла. к азоту, что обычно требует большой разницы в электроотрицательности между вовлеченными элементами [2,17].

Среди различных составов бинарных многослойных нитридных покрытий на основе нитрида вольфрама (WN) до сих пор широко не исследовались. Несмотря на это, WN известен своими выдающимися качествами, такими как высокая твердость, химическая стабильность и впечатляющие трибологические характеристики [18,19]. Лишь ограниченное количество исследований изучало многослойные системы нитрида вольфрама в сочетании с нитридами различных переходных металлов. В частности, исследование, проведенное Duh и др. и Li и др. сосредоточились на тонких пленках, сочетающих CrN/WN, полученных с помощью таких методов, как магнетронное распыление и ионно-лучевое осаждение [20-23].

В этих исследованиях система CrN/WN неизменно демонстрировала положительные результаты. Внедрение структуры керамика/керамика привело к улучшению трибологических свойств, что проявляется в повышенной твердости многослойной системы (в диапазоне от 28,6 до 30,5 ГПа) по сравнению с отдельными слоями (24,3 ГПа для WN и 17,4 ГПа для CrN) [22]. Кроме того, включение ZrN в наноразмерные многослойные покрытия на основе WN привело к еще более высокой твердости – примерно 34 ГПа [24]. Кроме того, было обнаружено, что сочетание TiN и WN в многослойной архитектуре улучшает механические свойства и поведение обоих материалов при окислении [25-28].

Таким образом, текущее состояние исследований подчеркивает перспективность многослойных материалов на основе WN для трибологических применений. Ожидается, что эти покрытия выдержат сложные условия, такие как суровая сухая механическая обработка и высокоскоростная резка.

Анализ предыдущих исследований подчеркивает ключевую роль, которую играет износостойкий и твердый нитрид вольфрама (WN) в достижении высоких характеристик в многослойных бинарных нитридах [29,30]. Однако значение второго слоя нельзя недооценивать. Состав этого слоя существенно влияет на конечные свойства покрытия, улучшая или ухудшая функциональные свойства нитрида вольфрама. Примечательно, что все ранее изученные бинарные нитридные мультислои на основе WN были синтезированы исключительно с использованием методов магнетронного распыления и ионно-лучевого осаждения. Метод катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (CA-PVD), характеризующийся высокой степенью ионизации, позволяющий контролировать энергию ионного удара, не использовался для таких систем покрытия. Метод CA-PVD имеет множество преимуществ: точный стехиометрический контроль, хорошая адгезия, высокая скорость осаждения, испарение материала при низком напряжении (10–15 В), промышленная совместимость. Таким образом, основной целью данного исследования было выяснить, как второй слой влияет на микроструктуру, механические характеристики и трибологические характеристики многослойных покрытий CA-PVD на основе WN [31].

На высокотемпературные свойства многослойных материалов положительно влияют нитриды хрома и циркония, а также они работают совместно с нитридом вольфрама. Ожидается, что нитрид молибдена уменьшит износ и коэффициент трения за счет образования смазочной фазы Магнели [20,32–35]. Внедрение нитрида ниобия оптимизирует характеристики нитрида вольфрама благодаря его высокой твердости и износостойкости.

Примечательно, что сочетание WN и MoN в одной многослойной структуре ранее не изучалось [36,37].

В данном исследовании были исследованы физические закономерности получения WN/ZrN композитных покрытий методом вакуумного дугового осаждения. Кроме того, было проведено сравнение структурных особенностей, механических свойств и прочности сцепления с целью определения наиболее подходящего бинарного нитрида для многослойных материалов на основе WN.

2. Материалы и методы

2.1. Процедура осаждения. Многослойные покрытия WN/MeN (Me = Cr, Zr, Mo, Nb) были изготовлены методом дугового вакуумного осаждения на модернизированном оборудовании «БУЛАТ-6». Подложкой служила нержавеющая сталь Х6ХНТ18-11. После ультразвуковой очистки в ацетоне следовала бомбардировка ионами Ar+ в вакуумной камере для устранения остаточных поверхностных загрязнений. Для создания различных систем покрытий использовались пять чистых металлических мишеней (W, Cr, Zr, Mo и Nb, чистота 99,5%) из Харьковского физико-технического института. Во время осаждения рабочее давление составляло 0,73 Па, температура подложки поддерживалась на уровне 400°C, подложки были смещены до -150 В, а ток дуги был установлен на уровне 100 А. Расстояние между мишенью и подложкой было фиксированным и составляло 60 мм.

2.2. Химический состав и анализ микроструктуры. Для фазового анализа использовали рентгеновскую дифракцию на рентгеновском дифрактометре Panalytical Empyrean. Остаточные напряжения были проанализированы с использованием метода XRD с методом ω-2θ. Модули упругости для расчета остаточных напряжений были получены из измерений наноиндентирования, а коэффициенты Пуассона были взяты из литературы. Для изучения морфологии и поперечного сечения мультислоев WN/MeN использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения JEOL JSM 7600F (FE-SEM) с визуализацией обратных электронов (BSE). Характеризацию химического состава проводили с помощью рентгеновской спектроскопии с дисперсией по длине волны (WDS), оснащенной спектрометром Oxford Instruments Inca Wave.

2.3. Механические свойства и трибологическое поведение. Нанотвердость и приведенный модуль Юнга оценивали с помощью наноиндентора Anton Paar NHT2.

3.Результаты и обсуждение

Морфология поперечного сечения WN/ZrN, WN/CrN, WN/MoN и WN/NbN представлены на рисунке 1. Все многослойные покрытия продемонстрировали четко выраженную слоистость. Яркие слои были назначены WN, а темные принадлежали MeN (Me = Zr, Cr, Mo, Nb). При визуализации с помощью обратного рассеяния электронов более тяжелые элементы могут отклонять падающие электроны сильнее, чем легкие элементы. Следовательно, более тяжелые элементы кажутся ярче. Общая толщина покрытия варьировалась от 4,7 до 5,6 мкм. Кинетическая энергия ионов, генерируемых при катодно-дуговом испарении, может быть использована для объяснения уменьшения толщины бислоя мультислоев, образованных из Cr и Mo катодов. Его характерной формой является производство ионов с различной энергией от 20 до 200 эВ [38]. Значительное отличие энергии ионов W от ионов Cr и Mo (E_{Cr} = 71,6 эВ, E_{Mo} = 149 эВ, E_W = 117 эВ) [3,39] ведет к перемешиванию во время осаждения и к уменьшению толщины бислоя.

На рисунке 2 представлены рентгеновские спектры наноструктурированных покрытий из MeN/WN (Me = Zr, Cr, Mo и Nb). Фазовый анализ показал, что слой WN, общий для всех мультислоев, представляет собой фазу W2N типа ГЦК NaCl (JCPDF 00-025-1257). Образование однофазной ГЦК-структуры в нитриде вольфрама возможно в диапазоне 30 ат.% < N < 55 ат.%, что хорошо согласуется с наблюдениями в этом исследовании. Но каждая система покрытия имеет уникальный внутренний второй нитридный слой. Покрытия можно разделить на две категории в зависимости от структуры второго слоя: (i) WN/ZrN и WN/CrN (рис. 2a), (ii) WN/MoN и WN/NbN (рис. 2b).

Основная тенденция, наблюдаемая в первой группе мультислоев, заключалась в изоструктурном росте в процессе осаждения. По результатам РДА слои CrN и ZrN, подобные WN, имели структуру NaCl-ГЦК F_{m3m}. На рисунке 2a в спектрах показаны дифракционные пики для (111), (200), (220) и (311), соответствующие CrN (F_{m3m}, JCPDS 11-0065), ZrN (F_{m3m}, JCPDS

35-0753) и W2N (F_{m3m}, JCPDS 25-1257). В покрытии WN/ZrN рефлексы (311) были немного более заметными, но существенной предпочтительной ориентации не было очевидно. Напротив, WN/CrN имел заметную текстуру (200). Из-за схожести параметров решетки (несовпадение 0,45%) пики CrN и W_2N на рентгенограмме перекрывались. И наоборот, фазы, составляющие покрытие WN/ZrN, были четко разделены из-за разницы в ГЦК-решетках на 8,1%.

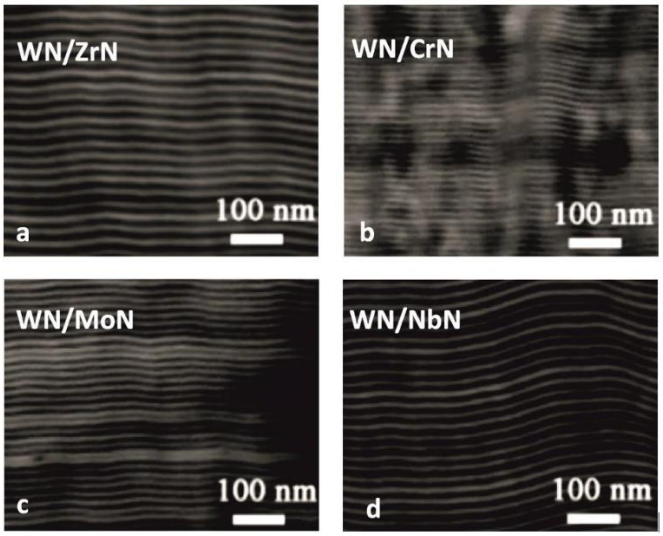


Рисунок 1 – РЭМ-изображения поперечного сечения многослойных систем покрытий на основе WN

Кроме того, дифракционные пики смещались в сторону меньших углов, что потенциально было вызвано внутренними напряжениями во время осаждения или остаточными напряжениями сжатия, возникающими из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения. Покрытия WN/CrN и WN/ZrN имели остаточные напряжения сжатия примерно -7462,7 ± 245,5 МПа и -4865,6 ± 306,6 МПа. Незначительные сдвиги пиков в сторону меньших углов 2θ наблюдались в плоскостях (200) и (111) ZrN и W2N соответственно, возможно, из-за дефектов упаковки и деформации решетки.

Мультислои второй группы имели характерную поликристаллическую структуру с ГЦК- и гексагональной фазами в слоях MoN и NbN. Однако слой WN в обоих покрытиях сохранил единственную ГЦК-структуру. Хотя рентгеноструктурный анализ не обнаружил кубического γ-Mo2N, анализ HR-TEM подтвердил его присутствие. Покрытие WN/MoN включало фазы ГЦК-W2N, гексагональную δ-MoN (P_{31m}), δ3-MoN (P_{63mc}) и ГЦК-Mo2N (F_{m3m}) (рис. 2b). Несмотря на отсутствие кубического γ-Mo2N в рентгеноструктурном анализе, WDS-анализ показал содержание азота около 54,2 ат.%, что способствует образованию стехиометрических гексагональных фаз MoN. Пики сместились в сторону меньших углов дифракции, что указывает на расширение решетки и более высокие сжимающие напряжения. Покрытие имело остаточное напряжение сжатия примерно -7226,2 ± 618,8 МПа.

Среди четырех мультислоев на основе нитрида вольфрама (WN) наиболее благоприятные механические свойства продемонстрировал WN/NbN. В частности, он показал высокую твердость (35,7 ± 1,2 ГПа) наряду с самым низким модулем Юнга (383,9 ± 27,6 ГПа), как показано на рисунке 3a. Модуль Юнга является важнейшим параметром, характеризующим жесткость материала. Хотя повышенная твердость желательна для покрытий, используемых в трибологии, низкий модуль Юнга необходим для повышения устойчивости к деформации. Следовательно, покрытия с низким модулем Юнга и высоким соотношением H/E около 0,1 считаются упругими.

Эти результаты можно объяснить нанокомпозитной природой слоев NbN, которые состоят из двух нанокристаллических фаз (гексагональной и кубической). Гексагональная фаза δ'-NbN, характеризующаяся более высокой ковалентностью, способствует повышению

твердости, что объясняет наблюдаемую высокую твердость покрытия WN/NbN. Структура нанокомпозита, объединяющая эти две фазы в слоях NbN и многослойную архитектуру покрытий WN/NbN, придает повышенную эластичность и устойчивость к растрескиванию.

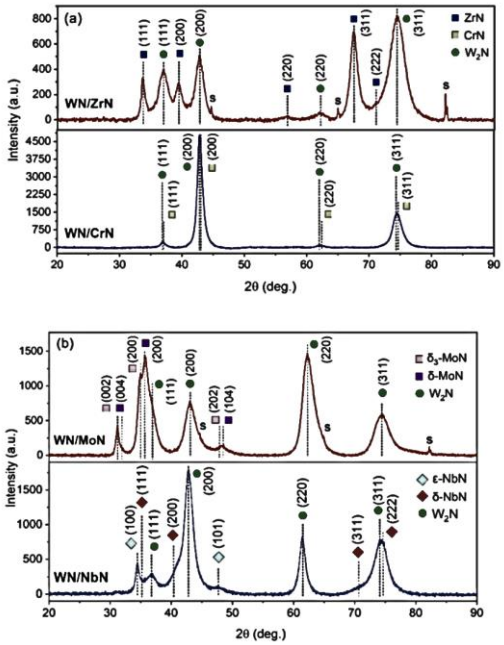


Рисунок 2 – Рентгенограммы многослойных покрытий на основе WN:
(а) WN/CrN и WN/ZrN; (б) WN/MoN и WN/NbN

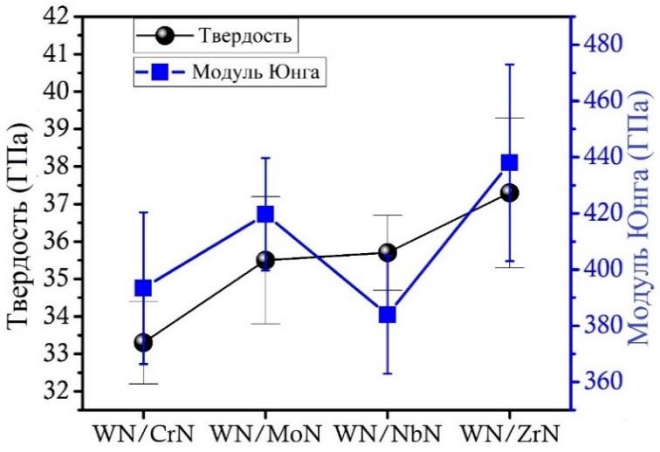


Рисунок 3 – Твердость и модуль Юнга

Заключение

Исследование нанокомпозитных многослойных покрытий (WN/ZrN, WN/CrN, WN/MoN и WN/NbN), нанесенных методом CA-PVD, существенно повлияло на микроструктуру, механические свойства, характеристики трения и износостойкость многослойных покрытий на основе нитрида вольфрама.

В зависимости от микроструктуры, полученные композитные покрытия можно разделить на две группы: (i) все составляющие слои имеют кубическую структуру типа NaCl (WN/Zr и WN/CrN) и (ii) слои WN, содержащие ГЦК-фазу W_2N, в то время как в других слоях наблюдается сочетание гексагональной и ГЦК-кубических фаз типа NaCl (δ-MoN, δ3-MoN и γ-Mo_2N в WN/MoN, а также ε-NbN и δ-NbN в WN/NbN).

Все системы покрытий WN/ZrN, WN/CrN, WN/MoN и WN/NbN продемонстрировали высокую твердость в диапазоне от 33,3 ± 1,7 ГПа до 37,3 ± 2,4 ГПа. Многослойный материал WN/NbN продемонстрировал максимальное значение упругой деформации до разрушения

(отношение H/E) около 0,093. Значения коэффициента трения были одинаковыми для всех покрытий и находились в диапазоне от 0,47 до 0,55.

Следовательно, многослойное покрытие WN/NbN, обладающее исключительной износостойкостью и механическими свойствами, является перспективным в качестве эффективного твердого защитного покрытия для требовательных трибологических применений.

Список литературы

1. Barshilia H.C. Structure, hardness and thermal stability of nanolayered TiN/CrN multilayer coatings / H.C. Barshilia, A. Jain, K.S. Rajam // Vacuum. – 2003. – Vol. 72, № 3. – P. 241-248.
2. Pogrebnjak A. Nanocomposite Multilayer Binary Nitride Coatings Based on Transition and Refractory Metals: Structure and Properties / A. Pogrebnjak, K. Smyrnova, O. Bondar // Coatings. – 2019. – Vol. 9, № 3. – P. 155.
3. Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Advanced Layered WN/MeN (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) Nanocomposite Coatings / K. Smyrnova et al. // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 3. – P. 395.
4. Structural Phase Transformations in Detonation Coatings Based on Ti3SiC2 after Pulse-Plasma Effect / B. Rakhadilov et al. // Crystals (Basel). – 2022. – Vol. 12, № 10. – P. 1388.
5. Structural, mechanical and tribocorrosion behaviour in artificial seawater of CrN/AlN nano-multilayer coatings on F690 steel substrates / F. Ma et al. // Appl Surf Sci. – 2018. – Vol. 428. – P. 404-414.
6. Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating / Y.H. Cheng et al // Surf Coat Technol. – 2010. – Vol. 205, № 1. – P. 146-151.
7. Microstructures and properties of Zr/CrN multilayer coatings fabricated by multi-arc ion plating / X. Guan et al // Tribol Int. – 2017. – Vol. 106. – P. 78-87.
8. Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review / M. Khadem et al. // Friction. – 2017. – Vol. 5, № 3. – P. 248-262.
9. Toughness enhancement in hard ceramic thin films by alloy design / H. Kindlund et al // APL Mater. – 2013. – Vol. 1, № 4.
10. Investigation of wear dynamics for cutting tools with multilayer composite nanostructured coatings in turning constructional steel / A. Vereschaka et al. // Wear. – 2019. – Vol. 420-421. – P. 17-37.
11. Structures and properties of hard and superhard nanocomposite coatings / A.D. Pogrebnyak et al // Physics-Uspekhi. – 2009. – Vol. 52, № 1. – P. 29-54.
12. Needham P. The source of chemical bonding / P. Needham // Studies in History and Philosophy of Science Part A. – 2014. – Vol. 45. – P. 1-13.
13. Gaffney J.S. Chemical Bonding – The Formation of Materials / J.S. Gaffney, N.A. Marley // General Chemistry for Engineers. – 2018. – P. 75-116.
14. Mechanical properties of boron nitride thin films prepared by atomic layer deposition / M. Weber et al // CrystEngComm. – 2017. – Vol. 19, № 41. – P. 6089-6094.
15. Novel and Facile Route for the Synthesis of Tunable Boron Nitride Nanotubes Combining Atomic Layer Deposition and Annealing Processes for Water Purification / M. Weber et al // Adv Mater Interfaces. – 2018. – Vol. 5, № 16.
16. Stephanos J.J. Chemical Bonding / J.J. Stephanos, A.W. Addison // Electrons, Atoms, and Molecules in Inorganic Chemistry. – 2017. – P. 147-226.
17. Mayrhofer P.H. Self-Organized Nanostructures in Hard Ceramic Coatings / P.H. Mayrhofer, C. Mitterer, H. Clemens // Adv Eng Mater. – 2005. – Vol. 7, № 12. – P. 1071-1082.
18. Tribological properties and oxidation resistance of tungsten and tungsten nitride films at temperatures up to 500 °C / D. Javdošňák et al // Tribol Int. – 2019. – Vol. 132. – P. 211-220.
19. Influence of process parameters on properties of reactively sputtered tungsten nitride thin films / M.L. Addonizio et al // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2012. – Vol. 30, № 3.
20. Microstructure, mechanical and tribological properties of CrN/W2N multilayer films deposited by DC magnetron sputtering / R.L. Li et al // Surf Coat Technol. – 2009. – Vol. 204, № 4. – P. 470-476.

21. Tsai Y.-Z. Thermal stability and microstructure characterization of CrN/WN multilayer coatings fabricated by ion-beam assisted deposition / Y.-Z. Tsai, J.-G. Duh // Surf Coat Technol. – 2005. – Vol. 200, № 5-6. – P. 1683-1689.
22. Tsai Y.-Z. Tribological behavior of CrN/WN multilayer coatings grown by ion-beam assisted deposition / Y.-Z.Tsai, J.-G. Duh // Surf Coat Technol. – 2006. – Vol. 201, № 7. – P. 4266-4272.
23. Wu F.-B. Manufacture, microstructure and mechanical properties of CrWN and CrN/WN nanolayered coatings / F.-B. Wu, S.-K. Tien, J.-G. Duh // Surf Coat Technol. – 2005. – Vol. 200, № 5-6. – P. 1514-1518.
24. Influence of Ar/N2 flow ratio on structure and properties of nanoscale ZrN/WN multilayered coatings / M.X. Wang et al // Surf Coat Technol. – 2007. – Vol. 201, № 9-11. – P. 5472-5476.
25. Characteristics of TiN/W 2 N multilayers prepared using magnetron sputter deposition with dc and pulsed dc powers / C.-L. Chang et al // Surf Coat Technol. – 2016. – Vol. 303. – P. 25-31.
26. Toughness enhancement in TiN/WN superlattice thin films / J. Buchinger et al // Acta Mater. – 2019. – Vol. 172. – P. 18-29.
27. Ye F. The elevated-temperature wear properties of TiN and TiN/W 2 N coatings / F. Ye, H. Zhao, X. Tian // Mater Res Express. – 2018. – Vol. 5, № 10. – P. 106404.
28. Zhao H. Compared the oxidation behavior of TiN and TiN/W2N ceramic coatings during heat treatment / H. Zhao, P. Mi, F. Ye // Mater Chem Phys. – 2018. – Vol. 217. – P. 445-450.
29. Panda R.N. Synthesis of High Surface Area W 2 N and Co–W–N Nitrides by Chemical Routes / R.N. Panda, S.B. Dalavi, J. Theerthagiri // Adsorption Science & Technology. – 2012. – Vol. 30, № 4. – P. 345-354.
30. Polcar T. Structural and tribological characterization of tungsten nitride coatings at elevated temperature / T. Polcar, N.M.G. Parreira, A. Cavaleiro // Wear. – 2008. – Vol. 265, № 3-4. – P. 319-326.
31. Introduction to solar energy and its conversion into electrical energy by using dye-sensitized solar cells / N.H. Rased et al // Energy Materials. – 2021. – P. 139-178.
32. Molybdenum Nitride Films: Crystal Structures, Synthesis, Mechanical, Electrical and Some Other Properties / I. Jauberteau et al // Coatings. – 2015. – Vol. 5, № 4. – P. 656-687.
33. Balasubramanian K. Phase stability and mechanical properties of Mo1- x N x with 0 ≤ x ≤ 1 / K. Balasubramanian, L. Huang, D. Gall // J Appl Phys. – 2017. – Vol. 122, № 19.
34. The Effect of Substrate Treatment on the Properties of TiAlSiYN/CrN Nanocomposite Coatings / A. Pogrebnjak et al // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 30. – P. 101902.
35. Effects of RF magnetron sputtering power on the structure and nanohardness of high-entropy alloys (TiVCrNbSiTaBY)N hard coatings / X. Zhang et al // Ceram Int. – 2023. – Vol. 49, № 20. – P. 33418-33424.
36. Phase composition and mechanical properties of homostructure NbN nanocomposite coatings deposited by modulated pulsed power magnetron sputtering / Y.G. Li et al // Surf Coat Technol. – 2020. – Vol. 385. – P. 125387.
37. Structure and properties of NbN/MoN nano-multilayer coatings deposited by magnetron sputtering / T. Wang et al // J Alloys Compd. – 2017. – Vol. 729. – P. 942-948.
38. Insights into surface modification and erosion of multi-element arc cathodes using a novel multilayer cathode design / M. Golizadeh et al // J Appl Phys. – 2020. – Vol. 127, № 11.
39. Anders A. Unfiltered and Filtered Cathodic Arc Deposition / A. Anders // Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. – 2010. – P. 466-531.

А. Касымбаев[1*], К. Смирнова[2], А. Погребняк[2]
[1] Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Протозанова көш. 69
[2]Сумы мемлекеттік университеті,
40007, Украина, Сумы қ., Римский-Корсаков көш.2
*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

WN/ZrN ҚҰРАМАЛЫ ҚАПТАМАЛАРДЫ ВАКУУМДЫҚ ДОҒАЛЫҚ ТҰНДЫРУ ӘДІСІМЕН АЛУДЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЗАҢДАЛЫҚТАРЫ

Құралдың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін экстремалды жұмыс жағдайында қолданылатын құралдарға қойылатын талаптардың жоғарылауына байланысты қорғаныс жабындары кеңінен

қолданылады. Бұл жұмыста WN негізіндегі көпқабатты нанокомпозиттердің MeN жабындарын (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) алудың физикалық принциптері, сонымен қатар микроқұрылымға, фазалық құрамына, сонымен қатар механикалық және трибологиялық қасиеттерге әсері қарастырылады. Көпқабатты WN/MoN жабындары қолданудың жаңа саласы болып табылады және катодтық доғаның физикалық буының тұндыруы (CA-PVD) бұл жабындарды өндіру үшін алғаш рет қолданылады. Сонымен қатар, тұндырылған көпқабаттардың қасиеттерін жақсырақ түсіну үшін бірінші принциптер бойынша есептеулер орындалады. Әр түрлі тор түрлері бар екі жабын микроқұрылымы байқалады: (i) бетке бағытталған текше және (ii) алтыбұрышты және fcc комбинациясы. Зерттелген жүйелердің ішінде WN/NbN ең төменгі тозу жылдамдығын (1,7 × 10^{-6} $мм^3$/Нм), жоғары қаттылықты және керемет икемділік индексін қоса алғанда, жоғары қасиеттерді көрсетеді. Өте жақсы трибологиялық өнімділікке бетінің төмен кедір-бұдырлығы, бұзылу алдындағы жоғары серпімді деформация, сырғанау кезінде Nb_2O_5 және WO_3 трибопленкаларының пайда болуы, NbN икемділігі және нанокомпозиттік құрылым сияқты факторларға жатқызуға болады.

Түйін сөздер: *покрытие; микроструктура; механические свойства; износостойкость; CA-PVD*

A. Kasymbaev[1*], K. Smirnova[2], A. Pogrebnyak[2]
[1] D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University,
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Protozanova 69 st.
[2]Sumy State University,
40007, Ukraine, Sumy, 2 Rimsky-Korsakov st.
*e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru

Due to the increased demands on tools used in extreme operating conditions, protective coatings are widely used to extend the service life of tools. This work examines the physical principles of obtaining MeN coatings (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) of multilayer nanocomposites based on WN, as well as the effect on the microstructure, phase composition, as well as mechanical and tribological properties. Multilayer WN/MoN coatings are a new field of application, and cathodic arc physical vapor deposition (CA-PVD) is used for the first time to produce these coatings. In addition, first-principles calculations are performed to better understand the properties of the deposited multilayers. Two coating microstructures with different lattice types are observed: (i) face-centered cubic and (ii) a combination of hexagonal and fcc. Among the systems studied, WN/NbN exhibits superior properties, including the lowest specific wear rate (1.7 × 10^{-6} mm^3/Nm), high hardness, and a remarkable ductility index. The excellent tribological performance can be attributed to factors such as low surface roughness, high elastic strain before failure, formation of Nb_2O_5 and WO_3 tribofilms during sliding, ductile behavior of NbN, and nanocomposite structure.

Key words: *coating; microstructure; mechanical properties; wear resistance; CA-PVD*

Сведения об авторах

Алексей Касымбаев* – докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6588-8098.

Катерина Смирнова – докторант, кафедра наноэлектроники и модификации поверхности, Сумской государственный университет, Украина, г. Сумы. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8993-996X.

Александр Дмитриевич Погребняк – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноэлектроники и модификации поверхности, Сумской государственный университет, Украина, г. Сумы; e-mail: alexp@i.ua. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9218-6492.

Авторлар туралы мәліметтер

Алексей Касымбаев* – докторанты, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6588-8098.

Катерина Смирнова – докторанты, Наноэлектроника және беттік модификация кафедрасы, Сумы мемлекеттік университеті, Украина, Сумы. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8993-996X.

Александр Дмитриевич Погребняк – физика-математика ғылымдарының докторы, Наноэлектроника және бетті модификациялау кафедрасының меңгерушісі, Сумы мемлекеттік университеті, Украина, Сумы; e-mail: alexp@i.ua. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9218-6492.

Information about the authors

Alexey Kasymbaev* – PhD student D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk; e-mail: alexey_kasymbayev@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6588-8098.

Katerina Smirnova – Ph.D. student, Department of Nanoelectronics and Surface Modification, Sumy State University, Ukraine, Sumy. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8993-996X.

Alexander Dmitrievich Pogrebnyak – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Nanoelectronics and Surface Modification, Sumy State University, Ukraine, Sumy; e-mail: alexp@i.ua. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9218-6492.

Поступила в редакцию 11.01.2024
Поступила после доработки 07.04.2024
Принята к публикации 08.04.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-57

МРНТИ: 67.09.31.

(cc) BY 4.0

А.Б. Кенесбеков[1,2*], Б.К. Рахадилов[1,3], Ж.Б. Сагдолдина[3], А.Е. Кусайынов[1,3]
[1]Институт композиционных материалов,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 39
[2]ТОО «PlasmaScience»,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7Г
[3]Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима 148
*e-mail: aidar.94.01@mail.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА СПЕЦИАЛЬНОЙ СМЕСИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНГИДРИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Аннотация: *В работе изучена технология получения плавиковой кислоты и особенности ее производства, а также выполнены физико-химические исследования свойств отхода. Подобраны активаторы, ускоряющие твердение ангидритового вяжущего. Был исследован процесс утилизации фторангидритового отхода производства плавиковой кислоты АО «Ульбинский металлургический завод» и получено ангидритовое безобжиговое вяжущее со сроками схватывания 30 мин. На основе полученных данных разработана технологическая схема изготовления изделий из ангидритового вяжущего. Эффективность принятой технологической схемы подтверждено экспериментально. Так же данная работа направлена на изучение возможности комплексного использования вторичного и техногенного сырья Ульбинского металлургического завода, которое в конечном счете приобретает значение не только важного резерва увеличения эффективности производства, экономической выгоды, сокращения нерационального отчуждения земельных ресурсов, но и защите от загрязнений водного и воздушного бассейна, так как вопросы экологической политики АО «УМЗ» в настоящее время являются актуальными. При исследовании характеристики техногенных отходов производства фтористоводородной кислоты, была показана их потенциальная пригодность для производства, ангидритового вяжущего и строительных материалов на его основы. Установлено влияние дисперсности известняка на полноту реакции нейтрализации.*

Ключевые слова: *Фторгипс, ангидрит, плавиковая кислота, ангидритовое вяжущее, активация, активатор.*

Введение

Как известно, наряду с уровнем качества в определении конкурентоспособности строительных материалов одним из важнейших факторов является их низкая себестоимость, что достигается энерго- и ресурсосберегающими технологическими решениями. С интенсивным развитием строительной индустрии существует актуальность производства высококачественных и конкурентоспособных в стоимостных отношениях гипсовых вяжущих материалов и изделий на их основе [1,2]. Они характеризуются легкостью, простотой изготовления, хорошей тепло- и звукоизоляционной свойствами, биологической стойкостью,